

基于分形理论的岩体结构面粗糙度影响因素研究

温 韬, 刘佑荣, 王 康, 杨臣刚, 牛超颖

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:岩体结构面粗糙度具有显著的各向异性、尺寸效应以及间距效应特征。为研究岩体结构面粗糙度的影响因素,以三维激光扫描试验数据为主,以分形随机函数生成数据为辅,分别从二维和三维角度展开研究。研究表明,不同采样方向的结构面视觉判断误差很大,需定量判断才更为科学;随着采样尺寸的增加,结构面粗糙度减小,当尺寸增加到有效尺寸时,粗糙度基本趋于平稳不再下降;随着采样间距的减小,结构面粗糙度增大,当采样间距小于有效间距时,粗糙度上升趋势变缓,趋于稳定状态;当采样间距过大时,岩体结构面粗糙度不再具备分形特征。

关 键 词:结构面; 粗糙度; 各向异性; 尺寸效应; 间距效应

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.10.014

岩体往往不是因为本身材料破坏发生失稳,而是沿着岩体内部的软弱结构面发生破坏。甚至可以说,岩体的稳定性在一定程度上是由这些结构面(特别是控制性结构面)所决定的^[1]。岩体结构面粗糙度的评价结果,不仅仅受到采样方向的影响,甚至在不同采样尺寸与采样间距下,得到的评价结果也大不相同。

作为影响结构面性质的重要因素,结构面粗糙度更多与分形理论结合在一起研究结构面表面起伏特征。岩体结构面具有明显的各向异性、尺寸效应和间距效应特征,这3项特征是目前研究结果互不一致甚至相互矛盾的主要原因所在^[2-12]。本文从结构面二维、三维剖面出发研究岩体结构面粗糙度的影响因素,突破了传统二维剖面替代整个三维结构面的局限性。

本文以雅砻江锦屏一级水电站大奔流沟料场Ⅱ号岩体结构面为例展开研究,该料场内Ⅱ号岩体结构面位于顺向边坡高程2040 m处,边坡开挖后露出,表面较完整,且出露结构面尺寸较大,满足研究要求。利用三维激光扫描仪,获取了结构面表面高精度点云数据,并借助Mandelbrot分形随机函数法对数据进行适当的补充^[14-15]。

1 岩体结构面粗糙度的各向异性

研究结构面粗糙度各向异性的关键是获取不同方向上的几何数据。对于二维情况,可以通过改变剖面提取方向来实现,对评价方法没有要求;而对于三维情况,不是所有的评价方法都可以考虑方向因素,可用的方法较少,需要选择合适的手段并对其加以改进。分析结构面粗糙度的各向异性,采样方向为唯一变量,采样尺寸与采样间距为常量。

1.1 二维角度

基于Ⅱ号岩体预处理后的点云数据,通过岩块中心点从X轴正方向开始逆时针转动,每隔15°切取,共获取结构面的二维剖面24条。对比图1(a)与(b)中的剖面线可知,即使是同一个剖面,采样方向不一样(从左到右与从右到左),其形态也是不一样的,两者呈相互对称关系,图中H为高度,L为长度。

具体采用2D覆盒子法,对24条具有相同长度(1 m)相同间距(0.01 m)的剖面线粗糙度进行分形分析。选取13个不同边长 δ 的正方盒子进行覆盖,最小边长为采样间距,并且以间距为间隔,依次增加。现以0°剖面为例,求出不同边长 δ 所对应的盒子个数 $N(\delta)$,详

见表 1 所示,由表可见,随着盒子尺寸的增加,用于覆盖剖面线的盒子数量不断减少,最多需要 131 个边长为 0.01 m 的盒子,最少需要 9 个边长为 0.13 m 的盒子。最终根据 24 条剖面的双对数坐标图,可以看出拟合的直线具有较高的相关性,说明岩体结构面二维剖面的确存在分形特征。

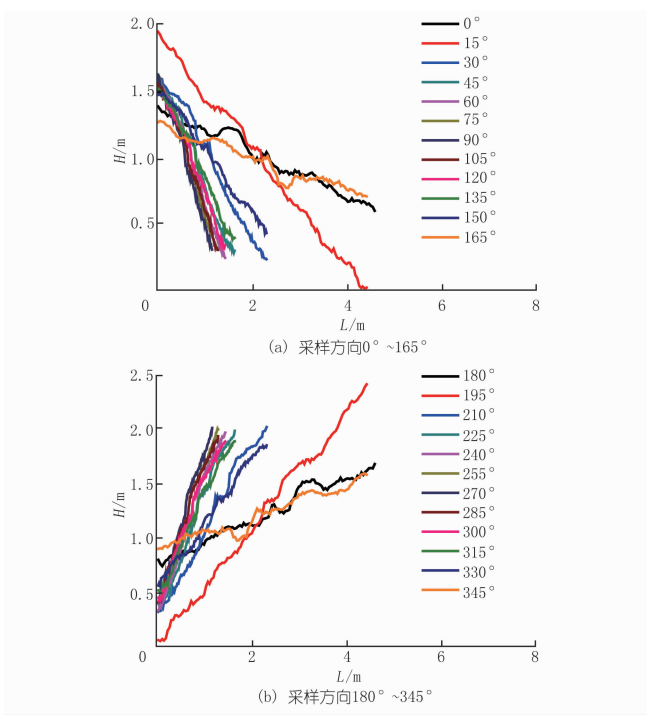


图 1 24 条二维剖面形态示意

表 1 0°剖面不同尺寸盒子覆盖所需数量计算结果

δ /m	N / 个	δ /m	N / 个
0.01	131	0.08	15
0.02	66	0.09	16
0.03	42	0.10	12
0.04	32	0.11	13
0.05	24	0.12	10
0.06	19	0.13	9
0.07	17		

1.2 三维角度

三维评价方法简单易懂便于应用,但是以单一剖面评价结果表征整个岩体结构面的粗糙度存在片面性,不能够反映结构面粗糙度的全部特征。基于三维数据表征粗糙度各向异性特征的评价方法不多。有学者提出利用赤平投影极点图法来表征粗糙度的各向异性^[15]。该方法可以直观地展示微小平面的产状信息,通过极点图能够在视觉上表征结构面粗糙度的各向异性。然而当微小平面比较多时,极点之间相互重叠,密密麻麻,通过视觉判断很难了解真实分布情况,往往使判断结果失真。因此,在此基础上,本文对该方法进行改进,实现定量分析。

具体改进思路就是定量统计所有在剪切破坏过程

中发挥阻抗作用的微小平面个数。实现方法为:结构面包含众多点云数据,设水平化前某一点 P 坐标为 (X, Y, Z) ,所有几何点可以拟合出一平面,拟合平面上与 P 点具有相同 XY 坐标的点 P' ,其坐标为 (X, Y, Z') ,那么水平化后曲面上相同位置处的点设为 Q ,其 XY 坐标同上, Z 坐标为

$$Z_Q = Z - Z' \tag{1}$$

对所有点云数据进行上述处理,便可实现水平化,并在此基础上建立岩体结构面三维几何模型(图 2),采用三角形单元进行表面重建。

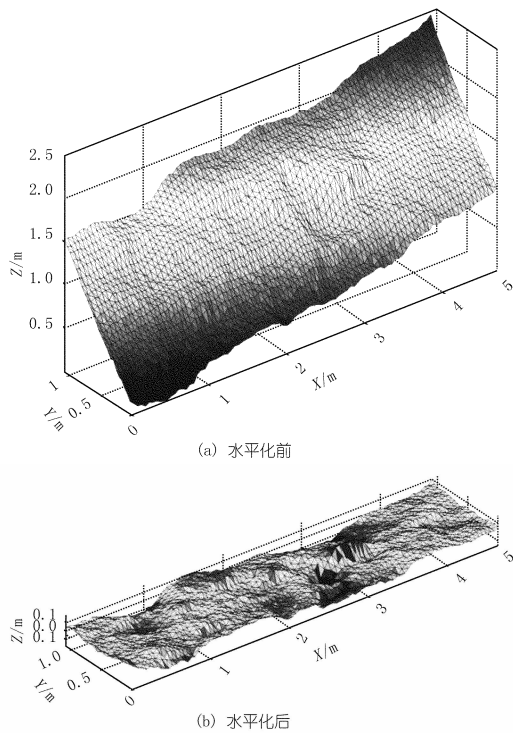


图 2 II 号岩体结构面水平化前后模型对比

计算每个微小平面的单位外法向量,再根据法向量结果,计算所对应的倾向倾角并绘制赤平投影极点图,如图 3 所示。视觉判断采样方向位于 $(160^\circ, 230^\circ)$ 之间的粗糙度比较大。

采样间距设置为 0.01 m 时,整个 II 号结构面被离散为 107 160 个微小平面,数量巨大。根据改进方法对粗糙度各向异性进行定量分析,结果见表 2。在采样尺寸和采样间距保持不变的情况下,135°采样方向上具有最多数量的微小平面达 55 829 个,表明粗糙度最大;315°剪切方向上数量最小达 51 331,粗糙度也随之最小;微小平面数量 NV 平均值为 53 531 个,定量分析结果与视觉判断不一致。这表明在大量数据条件下,视觉判断误差很大,定量判断显得更为科学。

无论二维还是三维角度,都显示岩体结构面粗糙度具有强烈的各向异性特征。因此在分析粗糙度时,务必明确所要研究的方向,采样方向一定要与岩体滑

动方向一致,这样评价结果才具有参考价值。

表 2 II 号岩体各个方向上抗阻微小平面个数

采样方向/(°)	NV	采样方向/(°)	NV	采样方向/(°)	NV
0	52354	135	55829	255	53599
15	52653	150	55617	270	52863
30	52910	165	55156	285	52396
45	53007	180	54806	300	51842
60	53289	195	54507	315	51331
75	53561	210	54250	330	51543
90	54297	225	54153	345	52004
105	54764	240	53871	360	52354
120	55318				

注:采样尺寸为 4.05 m×1.08 m。

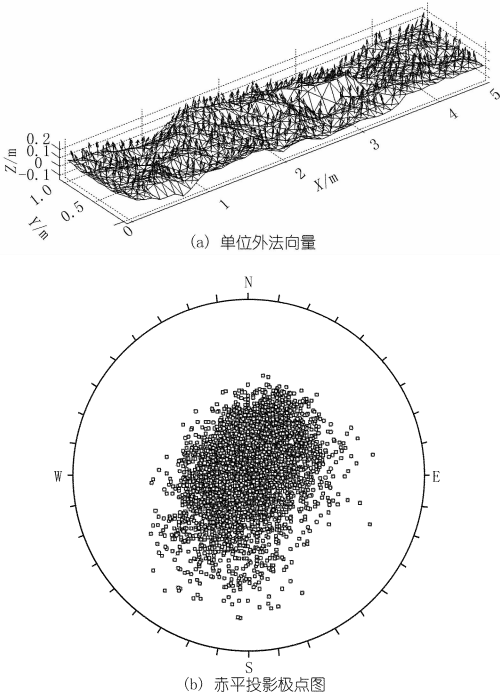


图 3 II 号结构面赤平投影极点图法结果示意

2 岩体结构面粗糙度尺寸效应

基于 II 号结构面点云数据,分别从二维与三维角度系统阐述粗糙度的尺寸效应。本文仅研究不同范围内采用相同精度的尺寸效应,需从点云数据中提取不同尺寸的结构面,保持矩形形状的 II 号结构面中心点不变,取长度约为宽度 4.19 倍的 9 个小矩形结构面。

2.1 二维角度

采用二维覆盒子法,求出每条剖面线的分形维数 D 值。同样采用 13 个不同尺寸盒子去覆盖剖面线,绘制出对应的双对数图,结果均表现出很高的拟合度系数。回归分析最终拟合结果如表 3 所示。表中 D 为分形维数,可由双对数图中拟合直线的斜率求得, K 为双对数图中拟合直线的截距, R^2 为拟合相关性系数,其值越接近于 1 说明拟合结果越好。

表 3 9 条剖面线分形分析结果

采样尺寸/m	采样方向/(°)	采样间距/m	D	K	R^2
0.50	180	0.01	1.299	-0.506	0.995
1.00	180	0.01	1.246	-0.136	0.993
1.50	180	0.01	1.219	0.064	0.996
2.00	180	0.01	1.187	0.237	0.993
2.50	180	0.01	1.219	0.272	0.997
3.00	180	0.01	1.170	0.423	0.993
3.50	180	0.01	1.197	0.442	0.997
4.00	180	0.01	1.206	0.487	0.997
4.50	180	0.01	1.200	0.540	0.996
平均值			1.216	0.203	0.995

表 3 的分形计算结果显示,当采样长度为 0.5 m 时, D 具有最大值 1.299,当采样长度取值为 3.0 m 时, D 具有最小值 1.170。不同长度岩体结构面剖面线的平均分形维数 D 为 1.216。整体上分形维数 D 值随着剖面线长度的增加呈减小趋势,但不会一直降低,而是达到一定长度(3.5 m)后,减小趋势变缓直至保持近似平衡,如图 4 所示。研究结果说明岩体结构面粗糙度在二维层面上具有尺寸效应。

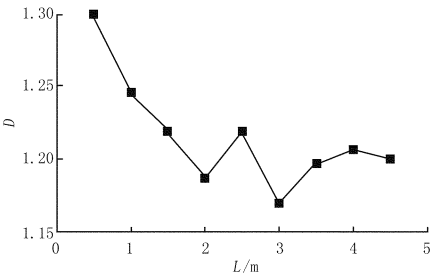


图 4 剖面线的分形维数随长度的变化曲线

2.2 三维角度

采用三维覆盒子法进行分形分析,同二维角度一样,选取 13 种立方体盒子尺寸,绘制出各自的双对数曲线图,并计算出相应的分形维数 D 。

表 4 中的分形计算结果是在采样尺寸为变量,采样间距为常量的前提下获取的,其拟合度系数 R^2 均大于 0.90,具有较高可信性。不同尺寸下的三维结构面分形维数 D 是各不相同的,最大值为 2.479,此时采样尺寸为 0.50 m×0.12 m,最小分形维数 D 是 2.136,采样尺寸为 3.00 m×0.72 m,平均 D 值为 2.200。与二维评价结果对比,不难发现两者具有近似的变化规律,特别是对于平均值,满足下述关系, $1.216 + 1 \approx 2.200$ 。该关系符合 Mandelbrot 提出的采用剖线分形维数 D 加 1 来近似表征三维粗糙表面分形维数 D 的思想^[16]。

整体上分形维数 D 会随着采样尺寸(面积 S) 的增加而减少,当采样尺寸大于等于 0.35 m×0.84 m 时,逐渐趋于平衡,如同二维角度分析结果一样,如图 5 所示。

表 4 三维覆盒子法分形计算结果

采样尺寸/(m×m)	采样间距/m	D	K	R^2	面积 S/m^2
0.50×0.12	0.01	2.479	-1.431	0.914	0.06
1.00×0.24	0.01	2.227	-0.455	0.991	0.24
1.50×0.36	0.01	2.183	-0.040	0.998	0.54
2.00×0.48	0.01	2.173	0.216	0.999	0.96
2.50×0.60	0.01	2.164	0.411	0.999	1.50
3.00×0.72	0.01	2.136	0.609	0.999	2.16
3.50×0.84	0.01	2.147	0.714	0.999	2.94
4.00×0.96	0.01	2.145	0.830	0.999	3.84
4.50×1.08	0.01	2.143	0.933	0.999	4.86
平均值		2.200	0.199	0.989	1.90

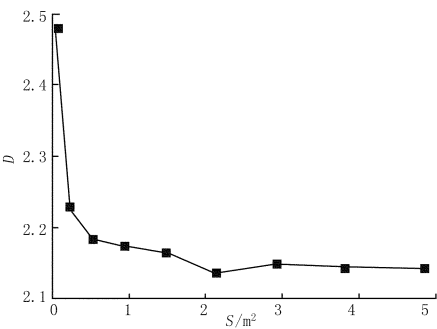


图 5 岩体结构面分形维数 D 随面积 S 的变化曲线

3 岩体结构面粗糙度间距效应

相对于岩体结构面粗糙度的各向异性与尺寸效应,关于间距效应的研究较少。采样间距实际上涉及采样精度,为采样相邻离散点之间的水平距离。间距越小,精度越高,间距越大,精度越小。

3.1 二维角度

采样间距分别采取 0.01,0.02,0.04,0.08,0.16,0.32 m 以及 0.64 m。可知相同的剖面线选用不同的精度测量时,获得的表面形态大不一样。视觉观测可知,采样间距越大,获取的岩体结构面剖面越光滑,忽略的结构面剖面几何信息也越多;而当采样间距越小时,越能捕获结构面剖面的细节变化特征,其形态与真实情况也越接近。

采用二维覆盒子法计算每种间距下的剖面粗糙度,同样选取 13 个盒子尺寸,绘制出 7 条剖面线所对应的双对数曲线($\log N(\delta) \sim \log \delta$)。当精度比较高时(采样间距较小),双对数曲线具有较高的拟合度,当精度降低时,拟合直线的相关性系数也在不断降低。

绘制出分形维数 D 、截距 K 与相关性系数 R^2 随采样间距变化情况,如图 6 所示。当间距 $d > 0.2$ m 时,分形维数 D 整体呈下降趋势,表明剖面线逐渐变得光滑,而当间距 $d < 0.2$ m 时,分形维数 D 变化幅度相对较小,且间距 $d > 0.48$ m 后,分形维数 D 小于 1,说明剖面线已不具备分形特征。截距 K 值整体上随着间距 d

的增加而降低。随着间距的增加,相关性系数 R^2 越来越远离 1,说明拟合度逐渐变差,这也说明剖面线的分形特征越来越不明显。

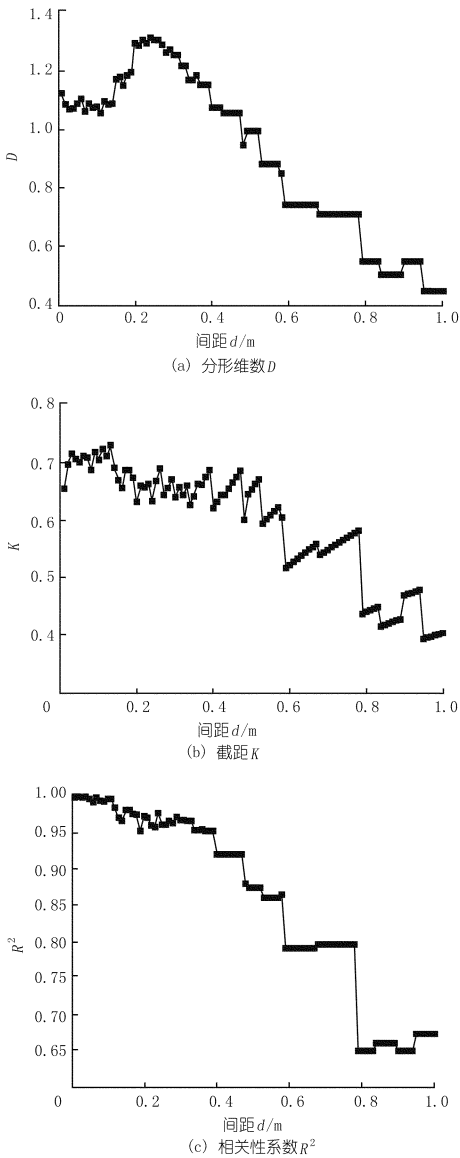


图 6 二维角度下分形参数随间距变化曲线

3.2 三维角度

采用 13 个不同大小的立方体盒子进行三维覆盒子法分析,绘制出所对应的双对数曲线。拟合分析显示,随着间距的变大,拟合直线斜率越来越缓,且拟合度逐渐变差。

通过计算双对数曲线的斜率、截距以及相关性系数,可以计算出 100 个不同间距下的三维岩体结构面分形维数 D 、 K 和 R^2 。根据数据可得,在相同采样方向与采样尺寸下,当间距 $d = 0.13$ m 时,分形维数 D 具有最大值 2.802 8;当间距 $d \geq 0.95$ m 时,分形维数 D 具有最小值 0.542 1;分形维数 D 平均值为 1.366 3。特别地,当间距 $d > 0.28$ m 时,求得的分形维数 D 小于 2,

说明当扫描精度过低时,岩体结构面三维形态数据中大量几何信息被忽略,使其已不具备分形特征,无法再用分形理论来描述岩体结构面的粗糙程度。上述变化规律与二维情况较为相符。

分别绘制分形维数 D 、截距 K 和相关性系数 R^2 随间距变化曲线(图 7)。对于分形维数 D ,当采样间距 $d < 0.1\text{ m}$ 时,变化幅度较小;当采样间距 $d > 0.1\text{ m}$ 时,整体上分形维数 D 随采样间距 d 的增加而减小,当采样间距 $d > 0.29\text{ m}$ 时,结构面表面形态已不服从分形特征,分形维数 D 小于 2。截距 K 变化规律不强,整体来看随采样间距 d 值增加而减小。相关性系数 R^2 随着采样间距 d 的增加,逐渐变小,拟合度越来越差,这也说明岩体结构面三维形态逐渐变得不服从分形特征。岩体结构面粗糙度间距效应在三维情况的变化规律与二维情况一致,都说明其具有强烈的间距效应,即采样间距的不同会给粗糙度评价结果造成显著影响。

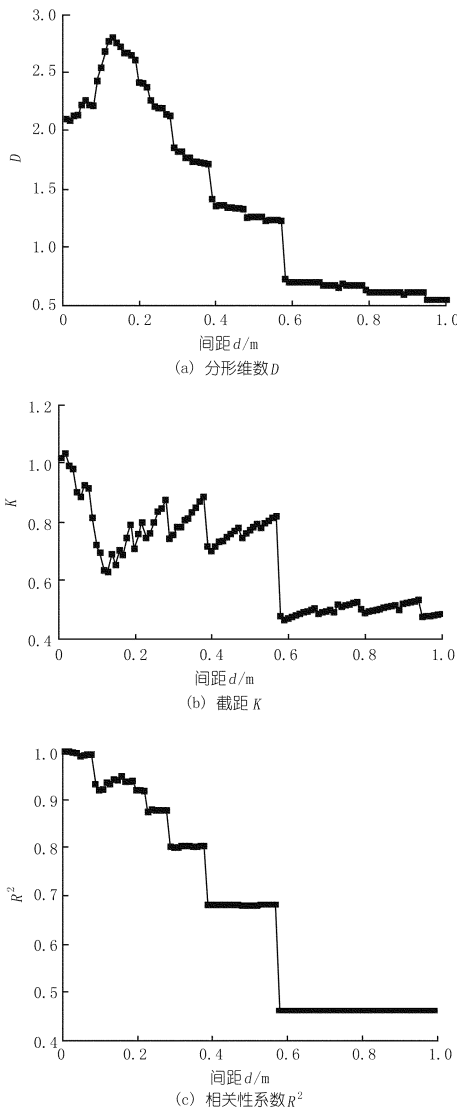


图 7 三维角度下分形参数随间距变化曲线

4 结 论

(1) 在大量数据条件下,赤平投影极点图法采用不同采样方向的结构面视觉判断误差很大。为此,对赤平投影极点图法进行了改进,使定量判断更为科学。

(2) 采用分形理论进行粗糙度分析的结果表明,由不同采样尺寸得到的结构面粗糙度不同;粗糙度会随着采样尺寸的增加而减小,当尺寸增加到有效尺寸时,结构面粗糙度基本趋于平稳。

(3) 不同采样间距的结构面具有不同的粗糙度。随着采样间距的减小,相应的粗糙度越来越大,当采样间距小到有效间距时,粗糙度上升趋势变缓,趋于稳定;当采样间距过大时,由于大量几何信息被忽略,岩体结构面粗糙度不再具备分形特征。

参考文献:

[1] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等.岩质边坡稳定性分析—原理·方法·程序[M].北京:中国水力水电出版社,2005.

[2] 杜时贵,唐辉明.岩体断裂粗糙度系数的各向异性研究[J].工程地质学报,1993,1(2):32-42.

[3] 王金安,谢和平.岩石断裂面的各向异性分形和多重分形研究[J].岩土工程学报,1998,20(6):16-21.

[4] Zhou H W, Xie H. Anisotropic characterization of rock fracture surfaces subjected to profile analysis [J]. Physics Letters A, 2004, 325 (5):355-362.

[5] 何满潮,胡江春,王红芳.岩石表面形态的各向异性及其摩擦特性研究[J].采矿与安全工程学报,2006,23(2):151-154.

[6] 殷黎明.甘肃北山花岗岩节理水力、力学特性研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2008.

[7] 殷黎明,杨春和,王贵宾,等.甘肃北山花岗岩节理表面形态特性研究[J].岩石力学,2009,30(4):1046-1050.

[8] 徐磊,任青文,叶志才,等.基于小波分析的岩体结构表面地貌各向异性研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(11):73-76.

[9] Roko R O, Daemen J J K, Myers D E. Variogram characterization of joint surface morphology and asperity deformation during shearing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(1):71-84.

[10] Baker B R, Gessner K, Holden E J, et al. Automatic detection of anisotropic features on rock surfaces [J]. Geosphere, 2008, 4 (2): 418-428.

[11] Nasser M H B, Grasselli, Mohanty B. Fracture toughness and fracture roughness in anisotropic granitic rocks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(4):403-415.

[12] 唐志成,夏才初,宋英龙,等. Grasselli 节理峰值抗剪强度公式再探[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):356-364.

[13] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain Statistical self-similarity and fractional dimension [J]. Science, 1967, 156 (3775): 636-638.

[11] 唐彤芝,李国英,徐竹青.土石坝沉降统计预报模型[J].水利水运工程学报,2001,(3):29-34.

[12] 李运,曲晓飞,李超,等.基于云理论的大连长兴岛招商项目评估研究[J].城市发展研究,2010,17(1):12-15.

[13] 王守信,张莉,李鹤松.一种基于云模型的主观信任评价方法[J].软件学报,2010,21(6):1341-1352.

[14] 王树良.基于数据场与云模型的空间数据挖掘和知识发现[D].武汉:武汉大学,2002.

[15] 吕辉军,王晔,李德毅,等.逆向云在定性评价中的应用[J].计算机学报,2003,26(8):1009-1014.

[16] 秦坤,王佩.基于云变换的曲线拟合新方法[J].计算机工程与应用,2008,44(23):56-58.

[17] Li Deyi, Duiyi, Yin Guoding, et al. Commonsense Knowledge Modeling[C]//16th World Computer Congress, Beijing, 2000.

(编辑:胡旭东)

Analysis on dam monitoring data based on cloud probability density estimation

WEI Qingbin

(Henan Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The dam monitoring is susceptible to the natural environment and monitoring conditions, and is variable in time and space, so the monitoring data is uncertain. Based on the randomness and uncertainty analysis method of cloud theory, and in combination with the ideas of spatial data radiation, the model of probability density distribution estimation of cloud droplets was established, and the probability density distribution function of cloud droplets was also derived. The distribution characteristic of matrix was obtained by the sample data, and the calculation program was designed on the basis of cloud transformation with backward algorithm. The cloud droplets probability density distribution characteristics and numerical characteristics of tube monitoring data and deformation data from 1979 ~ 1999 for Luhun Reservoir are analyzed, so the distribution characteristics and operation condition of monitoring data of the dam is estimated. The results show that the cloud droplet probability density distribution theory can be used to analyze the dam operation condition effectively, and further determine the change of monitoring environment and condition according to the numerical characters of cloud droplets.

Key words: dam monitoring data; cloud droplet probability density; data radiation; numerical characteristics of cloud droplets

(上接第 60 页)

[14] Mandelbrot B B. Self-affine fractals and fractal dimension[J]. Physica Scripta,1985,32(4):257-260.

[15] Kulatilake P H S W, Balasingam P, Park J, et al. Natural rock joint roughness quantification through fractal techniques[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2006,24(5):1181-1202.

[16] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York:Freeman,1983.

(编辑:郑毅)

Research on influential factors of rock mass structural plane roughness based on fractal theory

WEN Tao, LIU Yourong, WANG Kang, YANG Chengang, NIU Chaoying

(Faculty of Engineering, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China)

Abstract: The anisotropy, scale effect and interval effect are main characteristics of rock mass structure plane roughness. Based on the 3D laser scanning data and supplemented by the data generated by a random fractal function, the influential factors for rock mass structural plane roughness is analyzed from the 2D and 3D perspective respectively. The results show that visual judgment error of structural plane from different sampling directions is large, thus the quantitative judgment is necessary. With increase of sampling size, the structural plane roughness decreases, and the roughness tends to be stable when the sampling size reaches to an effective size; with the decrease of sampling interval, the structural plane roughness increases, and the roughness increases slowly and tends to be stable when the sampling interval reduces to an effective interval. When the sampling interval is too large, no fractal characteristics would exist.

Key words: structural plane; roughness; anisotropy; scale effect; interval effect